

⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑰ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 195 31 059 A 1

⑯ Int. Cl. 6:  
H 01 S 3/106

DE 195 31 059 A 1

⑲ Aktenzeichen: 195 31 059.4  
⑳ Anmeldetag: 23. 8. 95  
㉑ Offenlegungstag: 29. 2. 96

㉓ Unionspriorität: ㉒ ㉔ ㉕  
24.08.94 US 294969

㉗ Anmelder:  
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

㉘ Vertreter:  
Tiedtke, Bühlung, Kinne & Partner, 80336 München

㉙ Erfinder:  
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;  
Fermann, Martin E., Dr., Ann Arbor, Mich., US

㉚ Optische Impulsverstärkung unter Verwendung chirp-modulierter Bragg-Gitter

㉛ Chirp-modulierte Bragg-Gitter werden sowohl zum Dehnen als auch zum Komprimieren von ultrakurzen optischen Impulsen in einem Verstärkungssystem von chirp-modulierten Impulsen verwendet, so daß selbst Femtosekundenimpulse gedehnt und zu ihrer anfänglichen Form und Dauer wiederkomprimiert werden können. Wenn in chirp-modulierten Impulsverstärkungssystemen anstelle von Volumen-Beugungsgitterdehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen verwendet können Bragg-Gitter Kompaktheit, Robustheit und System-Effizienz ohne Beispiel bieten.

DE 195 31 059 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung richtet sich auf ein Verfahren und Gerät zum Strecken bzw. Dehnen ultrakurzer optischer Impulse vor der Verstärkung und zum darauf folgenden Wieder-Komprimieren der verstärkten Impulse zum Vermeiden von Verstärkungs-Verzerrung; und insbesondere auf die Verwendung von chirp-modulierten bzw. chirped Bragg-Gittern, um die Dehn- und Wieder-Kompressionsfunktion durchzuführen.

Kompakte Faser- und Diodenquellen für ultrakurze optische Impulse sind nicht in der Lage gewesen, signifikante Impulsenergien im Vergleich zu den entsprechenden Festkörper-Gegenstücken mit großer Größe zu erzeugen. Die Impulsenergien von Dioden- und Faserlasern schwanken bestenfalls typischerweise zwischen mehreren Pikojoule und dem Nanojoule-Niveau. Diese eingeschränkten Energien sind für einen breiten Bereich von praktischen Anwendungen, in denen die Verwendung von kompakten Ultrakurz-Impulsquellen hoch erwünscht sind, nicht ausreichend.

Möglicherweise können viel höhere Impulsenergien von seltenerdotierten Faserverstärkern entzogen werden. Zum Beispiel sind die Sättigungsenergien von erbiumdotierten Einzelmoden-Faserverstärkern (EDFA's) ungefähr 1  $\mu\text{J}$ . Bei solchen Energien würde jedoch die Spitzenleistung der verstärkten ultrakurzen Impulse unannehmbar hoch für eine Einzelmoden-Faser (ungefähr 1 MW für einen 1 ps Impuls). Wenn Licht mit solch einer hohen Leistung in dem kleinen Kern einer Faser eingeschlossen wäre, ergäben sich hohe Spitzenintensitäten, die unvermeidlich zu starken nichtlinearen Effekten und Aufbrechen von Impulsen führen würde. Die einzige Möglichkeit, dieses Problem zu vermeiden, ist, ausreichend niedrige Spitzenleistungen in dem Verstärker zu erhalten, d. h. gedehnte, relativ lange Impulse zu verstärken. Unter der Voraussetzung, daß die Anfangs-Impulse eine breite Bandbreite haben und geeignet chirp-moduliert sind, kann durch lineare Kompression der verstärkten Impulse (z. B. durch Verwendung von Beugungsgittern) eine kurze Impulsdauer erreicht werden.

Verfahren zur Verstärkung chirp-modulierter Impulse werden in den meisten der Lasersysteme verwendet, die ultrakurze Impulse mit hoher Energie erzeugen. In den letzten zehn Jahren beruhten Verstärkungssysteme für chirp-modulierte Impulse auf Volumen-Beugungsgitter-Dehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen. Die Idee der Verstärkung chirpmodulierter Impulse ist, daß ein ultrakurzer optischer Impuls vor der Verstärkung gedehnt wird und dann zu seiner Originalbreite wieder komprimiert wird, nachdem die Verstärkung beendet ist. Diese Verarbeitung läßt eine Verringerung der Verzerrung von ultrakurzen Impulsen in dem Verstärker zu und hohe Impulsenergien, während kurze Impulsdauern aufrecht erhalten werden. Kürzlich wurden chirpmodulierte lange Impulse direkt von einer abstimmbaren Laserquelle vor der Verstärkung erzeugt, und ultrakurze Energieimpulse wurden durch Komprimieren der verstärkten Impulse erhalten. Eine detaillierte Diskussion dieser Technik kann gefunden werden in: Galvanauskas et al., "Hybrid diodelaser fiber-amplifier source of high-energy ultrashort pulses" 19 Optics Letters 1043 (1994), welches hiermit durch Bezugnahme enthalten ist. Obwohl nach diesem Verfahren die Notwendigkeit der Gitter-Dehnvorrichtung bestigt ist, erfordert sie noch eine Beugungsgitter-Kompressionsvorrichtung.

In herkömmlichen Systemen waren Beugungsgitter-

Dehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen der einzige Typ der dispersiven Verzögerungsleitung, der für praktische Verstärkungssysteme für chirp-modulierte Impulse geeignet ist. Durch Verwendung verschiedener Konfigurationen können sowohl negative als auch positive Dispersionen erzielt werden. Die Größe der Dispersion reicht aus, um optische Impulse um das zehn- und hundertfache zu dehnen/wieder zu komprimieren, d. h. von Femtosekunden zur Größenordnung von zehn und hundert Pikosekunden. Solche Beugungsgitter-Anordnungen können Impulse mit sehr hohen Energien ohne jede Impulsverzerrung aufgrund von nichtlinearen optischen Effekten handhaben.

Solche dispersiven Verzögerungsleitungen können jedoch mehrere Haupt-Nachteile haben: Beugungsgitter-Anordnungen sind empfindlich hinsichtlich der Polarisierung und typischerweise groß (bis zu einige Meter lang), haben eine eingeschränkte Robustheit und einen eingeschränkten Energiedurchsatz (aufgrund der Beugungsverluste) und verzerrn das Profil des ausgegebenen Strahls. Diese Merkmale sind insbesondere in Verstärkungssystemen von chirpmodulierten Impulsen auf der Grundlage von kompakten Fasern und Laser-Dioden unerwünscht.

Bragg-Gitter sind für zahlreiche andere Zwecke bei der optischen Signalverarbeitung wie beispielsweise akustooptischen Filtern, wie in Tamir, Integrated Optics (Springer-Verlag New York, 1979) (hiermit durch Bezugnahme enthalten) beschrieben, und als dispersive Elemente verwendet worden. Bragg-Gitter können in optischen Fasern, in integrierten optischen Wellenleiterstrukturen und in Volumen-Materialien hergestellt werden. Ein Bragg-Gitter in einer Germanosilikat-Faser kann in dem Kern über eine lichtinduzierte periodische Brechungsindex-Veränderung hergestellt werden. Das Gitter kann direkt von der Seite einer Faser unter Verwendung von Ultravioletlicht strukturiert werden, wie in Meltz "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", Optics Letters, Bd. 14, Nr. 15, 1. August, 1989, S. 823, deren Offenbarung hiermit durch Bezugnahme enthalten ist, diskutiert. Unter Verwendung von Techniken zur Verstärkung der Photoempfindlichkeit können Gitter in jede Germanosilikat-Faser geschrieben werden, einschließlich Standard-Telekommunikationsfasern. Optische Wellenleitergitter können direkt unter Verwendung eines Halbleitermaterials gewachsen werden und werden am meisten als integrierte Bestandteile von Halbleiterlaserstrukturen verwendet (z. B. Laserdioden mit verteilter Bragg-Reflektor DBR oder mit verteilter Rückkopplung DFB). Weitere Materialien (z. B. LiTaO<sub>3</sub> oder LiNbO<sub>3</sub>) werden jedoch auch für integrierte Wellenleiterstrukturen mit zahlreichen Gitterstrukturen verwendet. Ein Beispiel für ein Volumen-Bragg-Gitter ist ein akustisch-optischer Filter. Durch Chirp-Modulation der elektrischen FR-Modulationswellenform kann ein chirp-moduliertes bzw. chirped Bragg-Gitter erhalten werden.

Neuerdings sind chirp-modulierte Bragg-Gitter auch verwendet worden, um Dispersion in optischen Wellenleitern zu kompensieren, wie in Fig. 1 veranschaulicht und detailliert in: Ouellette, F. "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", Optics Letters Bd. 12, Nr. 10, Okt. 1987, S. 847, beschrieben, welches hiermit durch Bezugnahme enthalten ist. Da optische Wellen bei Raten wandern, die von ihren Frequenzen abhängen, erreichen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen einen bestimmten Ort zu unterschiedlichen Zeiten, womit ein Dispersionspro-

blem erzeugt wird. Durch Anordnen von Bragg-Gitterfiltern in dem Wellenleiter kann dieses Dispersionsproblem in großem Maße reduziert werden.

Wie bei Ouellette diskutiert, ist die Wellenlänge  $\lambda_B$  einer optischen Welle, die von einer periodischen Bragg-Struktur reflektiert wird,  $\lambda_B = 2n\Lambda$ , worin  $\Lambda$  die Periode und  $n$  der Brechungsindex der Struktur ist. Wenn die Periode von solch einer Struktur entlang des Gitters variiert, werden optische Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen bei unterschiedlichen Positionen reflektiert. Dies ergibt eine wellenlängenabhängige Verzögerung  $\tau_\lambda$ :

$$\tau_\lambda = 2 L/V_g$$

Hier ist  $V_g$  die Gruppengeschwindigkeit von Licht in der Struktur und  $L$  ist der Abstand, den eine optische Welle mit Wellenlänge  $\lambda$  in das Bragg-Gitter eindringt. Daher bestimmt die Länge des Bragg-Gitters die maximale Verzögerungsdifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Wellenlängen und die Größe der Gitterperiodeschwankung (Gitter-Chirp) bestimmt die Reflexionsbandbreite der Struktur. Das maximale  $\tau_\lambda$  für eine wenige Zentimeter lange Struktur kann Hunderte von Pikosekunden sein, und die Bandbreite kann wenige zehn Nanometer erreichen.

Während Bragg-Fasergitter als optische Filter verwendet worden sind und chirp-modulierte Bragg-Fasergitter auch als disperse Elemente als Komponenten zur Dispersionskompensation verwendet worden sind, ist die Verstärkung von ultrakurzen optischen Impulsen auf die Verwendung von großen und ineffizienten Beugungsgitter-Dehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen beschränkt gewesen.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, chirp-modulierte Bragg-Reflexionsgitter in Verstärkungssystemen für chirpmodulierte Impulse zu verwenden, um die vorstehend festgestellten Nachteile von Beugungsgitteranordnungen zu beseitigen und solche Systeme kompakt, robust, zuverlässig und kosteneffektiv zu machen.

Es ist weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, faserinterne chirp-modulierte Bragg-Gitter als disperse Komponenten zu verwenden, die Femtosekunden-Impulse ohne großen Verlust von Impulsqualität und -form dehnen und wieder komprimieren.

Es ist weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Bragg-Gitter zu verwenden, um maximalen Energiedurchsatz und minimalen Verlust an Impulsqualität und -dauer zu erreichen.

Es ist weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, entgegengesetzte Fortbewegungsrichtungen in einem chirpmodulierten Bragg-Gitter zum Dehnen und Wieder-Komprimieren von ultrakurzen optischen Impulsen in einem chirp-modulierten Impuls-Verstärkungssystem zu verwenden.

Diese und weitere Aufgaben der vorliegenden Erfindung sind nun unter Verwendung der zahlreichen Ausführungsformen, wie nachstehend diskutiert, möglich, bei denen allen mindestens ein chirp-moduliertes Bragg-Gitter verwendet wird, um ultrakurze Impulse zu dehnen und/oder wieder zu komprimieren. Bei Betrieb werden die Impulse in bezug auf die Zeit gedehnt, wodurch ihre Spitzenenergie vor der Verstärkung verringert wird, und darauffolgend werden sie auf ihre ursprüngliche, schon verstärkte Form wieder komprimiert.

Damit die Erfindung vollständig verstanden wird, wird nun eine bevorzugte Ausführungsform unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrie-

ben, in denen:

- Fig. 1 das Prinzip von Impuls-Chirpen bzw. Impuls-Chirp-Modulation in einem Bragg-Gitter veranschaulicht;
- 5 Fig. 2 eine grundlegende Anordnung für die Verstärkung chirp-modulierter Impulse als Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;
- 10 Fig. 3 eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von zwei Bragg-Gittern zeigt;
- 15 Fig. 4a eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung eines optischen Zirkulators zur Verstärkung der Impulsenergie zeigt;
- 20 Fig. 4b eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung eines Polarisations-Strahltellers und einer  $\lambda/4$ -Wellenplatte zeigt;
- 25 Fig. 5a eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung zweier zwischengeschalteter Bragg-Gitter zeigt;
- 30 Fig. 5b eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung eines einzelnen Gitters und einer Standard-Faser als Dehnvorrichtung zeigt;
- 35 Fig. 5c eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zum Verstärken von chirp-modulierten langen Impulsen zeigt;
- 40 Fig. 6 eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die zum Testen verwendet wird, zeigt;
- 45 Fig. 7a eine graphische Darstellung der Signalverarbeitung zeigt, die von der in Fig. 6 gezeigten Ausführungsform durchgeführt wird;
- 50 Fig. 7b eine graphische Darstellung der Signalverarbeitung zeigt, die von einem System unter Verwendung einer Faser-Dehnvorrichtung und einer Bragg-Gitter-Kompressionsvorrichtung durchgeführt wird.
- 55 Fig. 1 veranschaulicht das Konzept, nach dem ein chirpmoduliertes Bragg-Gitter 1 einen optischen Impuls 2 oder 3 ausdehnet, der sich von einem Ende zum anderen bewegt und darauffolgend aus demselben Ende reflektiert wird, von dem er eingetreten ist. Dasselbe Gitter 1 kann auch die ausgebreiteten Impulse 4 und 5 wieder komprimieren, wenn sie wiederum in das Gitter 1 von der entgegengesetzten Richtung reflektiert werden. Somit ist der Prozeß unter Verwendung desselben Gitters 1 reversibel.
- 60 Die grundlegende Anordnung für die Verstärkung chirpmodulierter Impulse gemäß der vorliegenden Erfindung ist in Fig. 2 gezeigt, in der 50 : 50 Strahlteller 6a und 6b verwendet werden, um hereinkommende und reflektierte Strahlen an jeder Seite des Bragg-Gitters 1 zu trennen, und der gedehnte Impuls 10b in einem optischen Verstärker 9 verstärkt wird. Da die Impulse gedehnt werden, wird die Spitzenleistung in dem Verstärker 9 relativ niedrig gehalten, und Impulsverzerrungen aufgrund von nichtlinearen und Sättigungseffekten in dem Verstärker 9 werden vermieden. Daher kann die anfängliche Impulsform und -dauer bei viel höheren Impulsenergien als den anfänglichen wieder hergestellt werden.
- 65 Der Vorteil der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform ist, daß dasselbe Gitter 1 sowohl zum Dehnen als auch zum Wieder-Komprimieren verwendet werden kann. Natürlich wird mangelnde Perfektion des Gitters 1 (z. B. Unregelmäßigkeiten in der Gitterperiode oder Schwankungen des Brechungsindex entlang des Gitters 1) die Qualität der reflektierten Impulse beeinträchtigen. Wenn jedoch dasselbe Gitter 1 zum Dehnen und Wieder-Komprimieren verwendet wird, wird der Effekt der longitudinalen Unregelmäßigkeiten beseitigt, und die Verzerrung der wieder-komprimierten Impulse ist mini-

miert.

Wie in Fig. 3 gezeigt, können auch zwei Bragg-Gitterstrukturen 1a und 1b verwendet werden, um separat Impulse in einem chirp-modulierten Verstärkungssystem zu dehnen und wieder zu komprimieren. In dieser Ausführungsform sollten die zwei Gitter 1a und 1b dieselben Eigenschaften haben. In der Praxis werden jedoch einige Unterschiede zwischen zwei Gittern 1a und 1b während des Herstellungsverfahrens auftreten. Daher werden einige zusätzliche Verzerrungen der wieder komprimierten Impulsform 10d auftreten. Die Dauer und Form der wieder komprimierten Impulse 10d wird durch die Unterschiede der zwei Gitter stärker beeinträchtigt werden, wenn die anfängliche Impulsdauer kleiner wird und/oder die Dauer des gedehnten Impulses 10c länger wird.

Wie in Flg. 2 gezeigt, umfaßt das System mit einem einzelnen Bragg-Gitter 1 eine Dispersions-Kompensationsvorrichtung 7, um die Dispersion des optischen Verstärkers 9 oder von beliebigen weiteren zusätzlichen optischen Komponenten auf dem Weg des optischen Strahls zu kompensieren. Das System mit zwei Gittern 1a und 1b, wie in Fig. 3 gezeigt, kann auch den Unterschied der Dispersionen dieser zwei Gitter 1a und 1b über die Dispersions-Kompensationsvorrichtung 7 kompensieren. Solch eine Dispersions-Kompensation kann unter Verwendung von beispielsweise einem geeigneten Material, einer Wellenleiter-Struktur oder einer optischen Faser mit positiver oder negativer Dispersion (je nach Anforderungen in einem speziellen System) erreicht werden. Dies läßt zu, daß das System Impulse mit beschränkter Bandbreite selbst bei Ausgangssignalen des Systems mit optischen Femtosekunden-Impulsen erreicht.

In den in Fig. 2 und 3 gegebenen Beispielen wurden 35 50 : 50-Strahltreiler 6a und 6b als Mittel zum Separieren einfallender und reflektierter Wellen von den Bragg-Gittern 1a und 1b verwendet. Obwohl diese Ausführungsform leicht unter Verwendung teilweise reflektierender Spiegel oder Faserkopplern mit vier Öffnungen ("4-port fiber couplers") verwirklicht werden kann, werden nur bis zu 25% der Impulsenergie nach Dehnen oder Kompression verbleiben. Weitere Lösungen sind möglich, um den Energie-Durchsatz zu maximieren. Beispielsweise läßt ein optischer Zirkulator 11, wie in Fig. 4a gezeigt, bis zu 100% der Impulsenergie durchgehen.

Die Anordnung in Fig. 4b verwendet einen Polarisations-Strahltreiler 12 und eine  $\lambda/4$ -Wellenplatte 14, wobei fast 100% Transmission erreicht werden. Linear polarisiertes Licht 15 mit einer Polarisationsrichtung in einer parallelen Ebene wird durch den Polarisations-Strahltreiler 12 ohne großen Verlust durchgehen. Reflektiertes Licht 16 von dem Gitter geht zweimal durch die  $\lambda/4$ -Wellenplatte 14 durch, wodurch es eine senkrechte Richtung in bezug auf den eingegebenen Strahl erhält und wird somit von dem Strahltreiler 12 reflektiert.

Polarisations-Strahltreiler 12 sind insbesondere nützlich, wenn nur ein Bragg-Gitter 1 zum Dehnen und Wieder-Komprimieren verwendet wird. Ein kleiner Bruchteil Licht wird immer durch das ferne Ende des Gitters 1 transmittiert werden, daher wird es mit nur einem Gitter 1 insbesondere notwendig, zu verhindern, daß dieser transmittierte Impuls in dem Verstärker 9 verstärkt wird. Mit der Verwendung von Polarisations-Strahltreilern 12 kann dies leicht erreicht werden, indem man die Polarisations-Strahltreiler 12 an jedem Ende des Gitters 1 (und die Polarisationsrichtungen der entsprechenden

eingegebenen Strahlen) senkrecht zu einander orientiert. Das transmittierte Licht in einem Strahltreiler 12 wird dann senkrechte Polarisation in bezug auf das reflektierte Licht haben und nicht von dem Strahltreiler 12 abgelenkt werden.

Fig. 5a zeigt eine der vielen verschiedenen Varianten bei der Verwendung der Bragg-Gitter 1a und 1b in Verstärkungssystemen für chirp-modulierte Impulse gemäß der vorliegenden Erfindung. Bei Ouellette, Optics Letters, Bd. 16, Nr. 5, März 1991, S. 303 wurde gezeigt, daß wellenleiterinterne oder faserinterne chirp-modulierte Gitter gestaltet werden können, so daß sie in Transmission arbeiten, indem man gedehnte/komprimierte Impulse in eine Wellenleitermode einkoppelt, die von der des eingegebenen Impulses unterschiedlich ist. Gitter 1a und 1b vereinfachen das System, es wurden jedoch zusätzliche bekannte Einrichtungen (nicht gezeigt) allgemein hinzugefügt, um den verbleibenden verstärkten, nicht komprimierten Impuls 10c zu unterdrücken, der zusammen mit dem komprimierten Impuls 10d transmittiert werden kann. Es ist auch möglich, das System unter Verwendung weiterer bekannter Typen von dispersiven Verzögerungsleitungen in Kombination mit einem Bragg-Gitter 1 zu vereinfachen.

Fig. 5b zeigt ein Beispiel zur Verwendung der Standardfaser 13 als eine Dehnvorrichtung und eines faserinternen Gitters 1 als eine Kompressionsvorrichtung. In Verstärkungssystemen von chirp-modulierten Impulsen, in denen chirp-modulierte lange Impulse direkt von einer Laserquelle erzeugt werden, gibt es nur Bedarf für eine Bragg-Kompressionsvorrichtung 1, wie in Fig. 5c gezeigt.

Fig. 6 zeigt eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung mit zwei chirp-modulierten faserinternen Bragg-Gittern 1a und 1b.

Femtosekunden-Impulse wurden mit einem passiv modenverkoppelten Faserlaser (nicht gezeigt) erzeugt. Die anfänglichen Impulse 10a hatten eine 330 fs bandbreitenbeschränkte Dauer und eine Repetitionsrate von 8 MHz. Bragg-Gitter 1a und 1b wurden verwendet, wobei die Chirp-Modulation durch Faser-Deformation während der Belichtung erzeugt war. Die Gitter 1a und 1b waren 5 mm lang und hatten eine Reflexionsbandbreite von 20 nm und ein Reflexionsvermögen von 65%. Femtosekunden-Impulse 10a wurden durch das Gitter 1a auf 30 ps gedehnt. Die gedehnten Impulse 10b wurde in einem erbiumdotierten Faserverstärker verstärkt. Der Verstärker wurde mit  $\sim 200$  mW bei 980 nm von einer Laserdiode MOPA 17 gepumpt. Um die Dispersion zu minimieren, wurde eine 4,5 m lange erbiumdotierte Faser 13, die eine ungefähr 6-mal niedrigere negative Dispersion als die Standardfaser ( $D \approx -3\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ ) hatte, als der Verstärker 9 verwendet. Um den Effekt der negativen Dispersion von allen Fasern in dem Weg des Strahl zu kompensieren, wurden 70 cm Länge einer positiv dispersiven optischen Faser 13 ( $D = 86\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ ) am Beginn des Systems splice-verbunden bzw. gespleißt. Einfallende und reflektierte Strahlen wurden an einem Ende des Fasergitters unter Verwendung von standardisierten 50 : 50 Faserkopplern 18a und 18b getrennt. Der Durchsatz der Energie einschließlich Gitter-Verlusten war 16% sowohl für Dehnen als auch für Wieder-Komprimieren. Die Energie der gedehnten Impulse beim Eingang des Verstärkers war 20 pJ. Der Gewinn des Verstärkers wurde durch Anordnen von Pump- und Signalstrahlen, so daß sie sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen, und durch Verwendung von zwei faserinternen optischen Isolatoren

19a und 19b bei beiden Enden des Verstärkers 9 zur Verhinderung von Rückreflexionen maximiert. Die Energie der Impulse am Ende des Verstärkers 9 war 4 bis 6 nJ.

Um zu verifizieren, daß mehr Energie nach Dehnen und Wieder-Komprimieren wiederhergestellt werden kann, wurde die in Fig. 4b gezeigte Anordnung unter Verwendung von Volumen-Komponenten getestet. In dieser Ausführungsform war der Energie-Durchsatz auf 50% erhöht. Die verbleibenden 3 dB-Verluste wurde durch beschränktes Reflexionsvermögen des verwendeten Bragg-Gitters 1 und durch die 80%ige Kopplungseffizienz in die Gitterfaser verursacht. Viel höherer Durchsatz kann durch Verwendung von Gittern mit höherem Reflexionsvermögen und Ganzfaser-Polarisationskomponenten in der Anordnung von Fig. 4b erreicht werden.

Ausführungsformen mit einem einzelnen Bragg-Gitter 1 zum Dehnen und Wieder-Komprimieren und mit einer Standard-Faserdehnvorrichtung 13 anstelle des ersten Bragg-Gitters (wie in Fig. 5b) wurden auch aufgebaut; experimentelle Ergebnisse sind in den Fig. 7a bzw. 7b gezeigt. Unter Verwendung von zwei Fortbewegungsrichtungen in einem einzelnen chirp-modulierten Bragg-Gitter zum Dehnen und Wieder-Komprimieren wurden wieder-komprimierte 408 fs-Impulse für anfängliche, bandbreitenbeschränkte 330 fs-Impulse erhalten. Somit wurde durch die Gitteranordnung die Impulsbreite um nur 20% erhöht. Wie in Fig. 7a gezeigt, blieb hier die Impulsform nach der Wieder-Kompression im wesentlichen dieselbe wie beim Eingang in das System. Dies ist beträchtlich besser als die typischen Ergebnisse mit Beugungsgitter-Dehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen. Wenn die Standard-Faserdehnvorrichtung 13 verwendet wurde (170 m der optischen Standardfaser; D = 17 ps/nm·km), war der kürzeste wiederkomprimierte Impuls 544 fs, und die Impulsform war signifikant verändert (Fig. 7b).

Ein wichtiger Vorteil der Verwendung von Bragg-Gittern zum Dehnen und zur Wieder-Kompression ist, daß sie kleine Größen haben. Um Femtosekunden-Impulse auf die Dauer von Hunderten von Pikosekunden zu dehnen, ist nur ein wenige Zentimeter langes Gitter erforderlich (im Vergleich zu  $\approx 1$  m, was für eine Volumen-Beugungsgitter-Dehnvorrichtung erforderlich ist). Aufgrund dieser kurzen Wechselwirkungslänge können in einer Bragg-Kompressionsvorrichtung hohe Impulsennergien erreicht werden. Auch kann in einem Volumen-Bragg-Gitter die Strahlgröße groß sein, und hohe Spitzenintensitäten können vermieden werden. Chirp-modulierte bzw. chirped Bragg-Gitter können gestaltet werden, so daß sie bei jeder Wellenlänge arbeiten und ein hoher Energiedurchsatz kann erreicht werden. Bragg-Reflexion ist im allgemeinen Polarisationsunempfindlich. Doppelbrechung von Materialien und verwendeten Wellenleiterstrukturen kann jedoch einige Polarisationsempfindlichkeit verursachen. Im allgemeinen können Verzerrungen der Strahlqualität, die durch Bragg-Gitter eingeführt werden, vermieden werden. Wellenleiterinterne und faserinterne Strukturen sind insbesondere attraktiv zur Verwendung in Ganzfaser-, Ganzwellenleiter- oder Hybrid-Faser-Wellenleiter-Halbleiter Lasergestaltungen, die robuste, zuverlässige und kosteneffektive Systeme zur Verstärkung von chirp-modulierten Impulsen bieten.

Daher werden gemäß der vorliegenden Erfindung erfolgreich ihre Aufgaben gelöst, durch Bereitstellung eines kompakten Diodenlaser- und einer Faserquelle mit

ultrakurzen Impulsen mit hoher Energie. Die Impulsenegie kann viel höher als für frühere Systeme sein, und die Verstärkungsverzerrung des sich ergebenden Impuls kann wesentlich reduziert werden.

5 Die Erfindung ist nicht auf die vorstehend beschriebenen Ausführungsformen beschränkt, sondern es ist beabsichtigt, daß alle Veränderungen und Modifikationen der Erfindung, die keine Abweichung vom Geist und Umfang der Erfindung darstellen, enthalten sind.

Chirp-modulierte Bragg-Gitter werden sowohl zum Dehnen als auch zum Komprimieren von ultrakurzen optischen Impulsen in einem Verstärkungssystem für chirp-modulierte Impulse verwendet, so daß selbst Femtosekundenimpulse gedehnt und zu ihrer anfänglichen Form und Dauer wiederkomprimiert werden können. Wenn in chirp-modulierten Impulsverstärkungssystemen anstelle von Volumen-Beugungsgitterdehnvorrichtungen und -Kompressionsvorrichtungen verwendet können Bragg-Gitter Kompaktheit, Robustheit und System-Effizienz ohne Beispiel bieten.

#### Patentansprüche

1. Gerät zum Verstärken eines optischen Impulses, umfassend:

Erzeugungseinrichtungen zum Erzeugen eines optischen Impulses;  
Ausdehnungseinrichtungen, die optisch mit den Erzeugungseinrichtungen verbunden sind, zum Reduzieren der Spitzenamplitude des optischen Impulses und zum Erhöhen der Dauer des optischen Impulses;

Verstärkungseinrichtungen, die optisch mit der Ausdehnungseinrichtung verbunden sind, zum Erhöhen der Amplitude des optischen Impuls, nachdem der optische Impuls von der Ausdehnungseinrichtung ausgegeben worden ist; und

Einrichtungen zum Wieder-Komprimieren, die optisch mit der Verstärkungseinrichtung verbunden sind, zum Verringern der Dauer des optischen Impuls, nachdem der optische Impuls von der Verstärkungseinrichtung ausgegeben worden ist; worin die Ausdehnungseinrichtung und/oder die Wieder-Kompressionseinrichtung ein chirp-moduliertes Bragg-Gitter umfaßt.

2. Gerät nach Anspruch 1, bei dem die Ausdehnungseinrichtung und die Wieder-Kompressionseinrichtung dasselbe chirpmodulierte Bragg-Gitter umfassen.

3. Gerät nach Anspruch 1, bei dem die Ausdehnungseinrichtung ein chirp-moduliertes Bragg-Gitter zum Ausdehnen umfaßt und die Wieder-Kompressionseinrichtung ein chirp-moduliertes Bragg-Gitter zum Wieder-Komprimieren umfaßt.

4. Gerät nach Anspruch 1, ferner umfassend:  
Dispersionskompensationseinrichtungen zum Verringern der restlichen optischen Wellendiffusion in den optischen Impulsen.

5. Gerät nach Anspruch 2, ferner umfassend:  
Dispersionskompensationseinrichtungen zum Verringern der restlichen optischen Wellendiffusion in den optischen Impulsen.

6. Gerät nach Anspruch 3, ferner umfassend:  
Dispersionskompensationseinrichtungen zum Verringern der restlichen optischen Wellendiffusion in den optischen Impulsen.

7. Gerät nach Anspruch 1, ferner umfassend:  
Strahlteilereinrichtungen, die optisch mit minde-

stens einem der chirp-modulierten Bragg-Gitter verbunden sind, zum Trennen von optischen Impulsen, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

8. Gerät nach Anspruch 2, ferner umfassend:

Strahleiteleinrichtungen, die optisch mit mindestens einem der chirp-modulierten Bragg-Gitter verbunden sind, zum Trennen von optischen Impulsen, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

9. Gerät nach Anspruch 3, ferner umfassend:

Strahleiteleinrichtungen, die optisch mit mindestens einem der chirp-modulierten Bragg-Gitter verbunden sind, zum Trennen von optischen Impulsen, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

10. Verfahren zum Verstärken von optischen Impulsen, umfassend die folgenden Schritte:

Bereitstellen eines optischen Impulses;

Ausdehnen der Dauer des optischen Impulses über eine Zeitdauer, die länger als die ursprüngliche Dauer des optischen Impulses ist, während die Spitzenamplitude des optischen Impulses verringert wird, wobei ein ausgedehnter Impuls erzeugt wird; Verstärken des ausgedehnten Impulses, wobei ein verstärkter ausgedehnter Impuls erzeugt wird; und Wieder-Komprimieren des verstärkten ausgedehnten Impulses zur Originalform des optischen Impulses;

wobei mindestens einer der Schritte zum Ausdehnen und Wieder-Komprimieren unter Verwendung eines chirp-modulierten Bragg-Gitters durchgeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei sowohl der Schritt zum Ausdehnen als auch zum Wieder-Komprimieren unter Verwendung eines einzigen chirp-modulierten Bragg-Gitters durchgeführt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Schritte zum Ausdehnen und Wieder-Komprimieren unter Verwendung separater chirp-modulierter Bragg-Gitter durchgeführt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend den Schritt zum:

Verarbeiten des optischen Impulses zum Reduzieren der optischen Wellendispersion.

14. Verfahren nach Anspruch 11, ferner umfassend den Schritt zum:

Verarbeiten des optischen Impulses zum Reduzieren der optischen Wellendispersion.

15. Verfahren nach Anspruch 12, ferner umfassend den Schritt zum:

Verarbeiten des optischen Impulses zum Reduzieren der optischen Wellendispersion.

16. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend den Schritt zum:

Trennen der optischen Impulse, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

17. Verfahren nach Anspruch 11, ferner umfassend den Schritt zum:

Trennen der optischen Impulse, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

18. Verfahren nach Anspruch 12, ferner umfassend den Schritt zum:

Trennen der optischen Impulse, die auf die chirp-modulierten Bragg-Gitter einfallen, von optischen Impulsen, die von den chirp-modulierten Bragg-Gittern reflektiert worden sind.

---

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

---

**- Leerseite -**

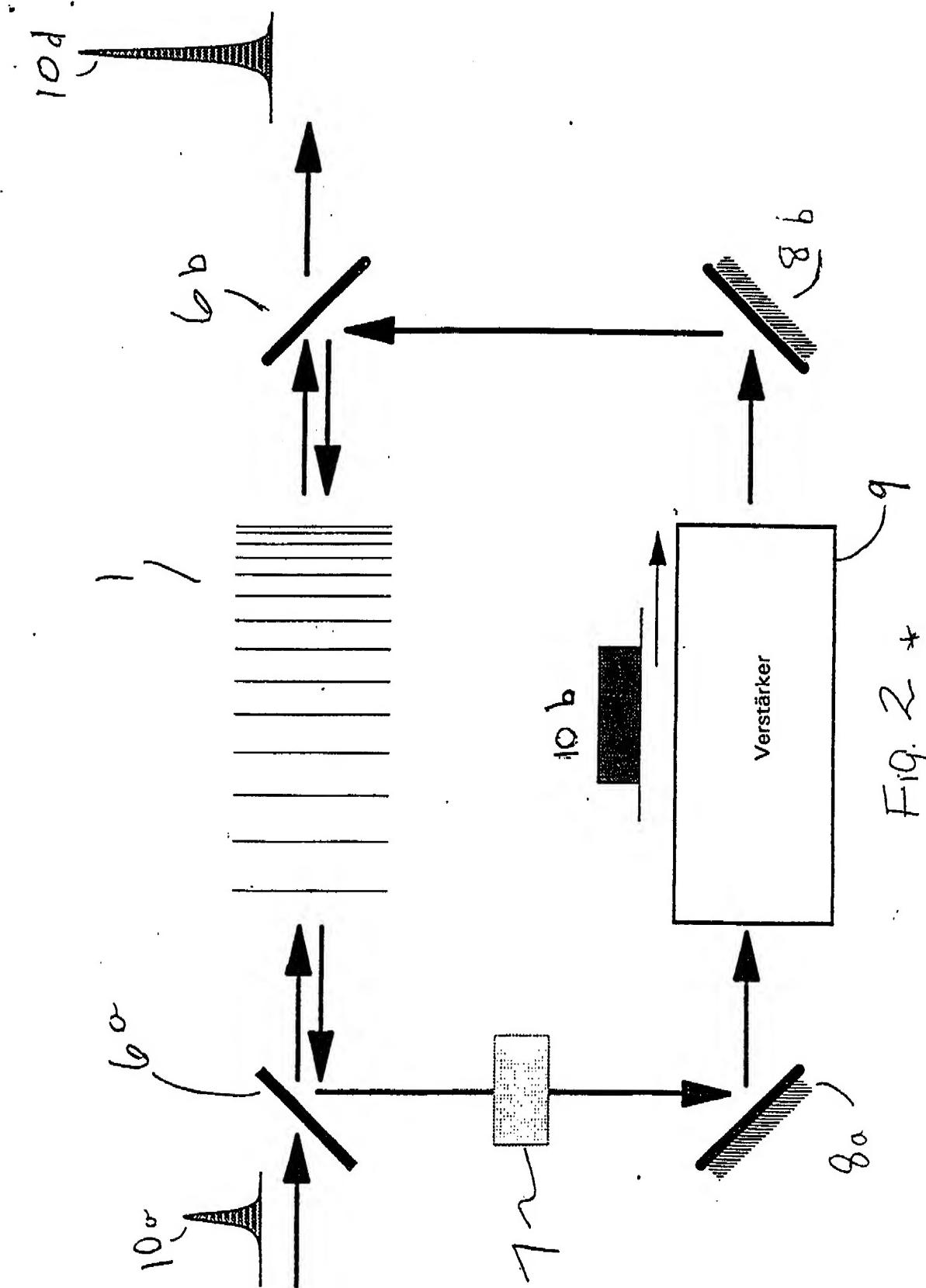


Fig. 2 \*

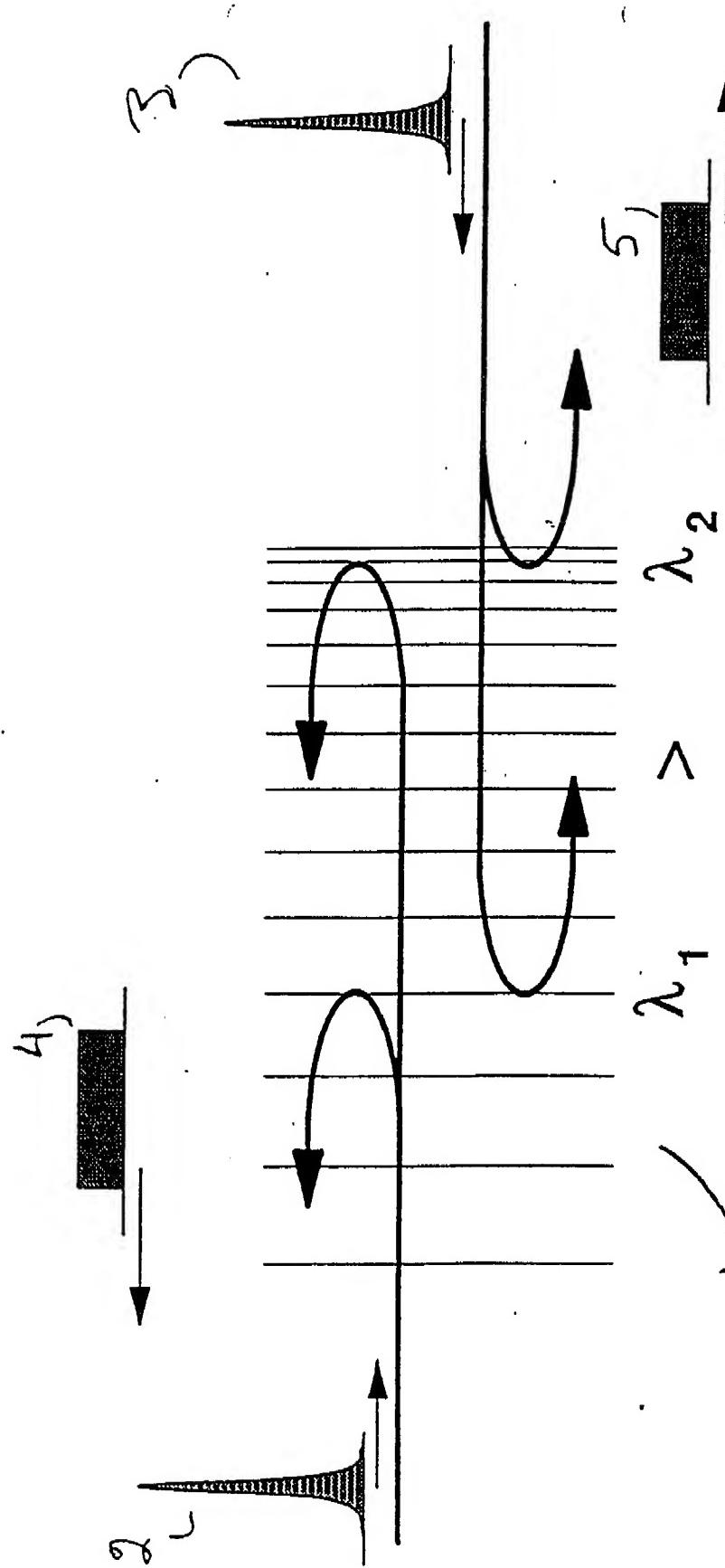


Fig. 1

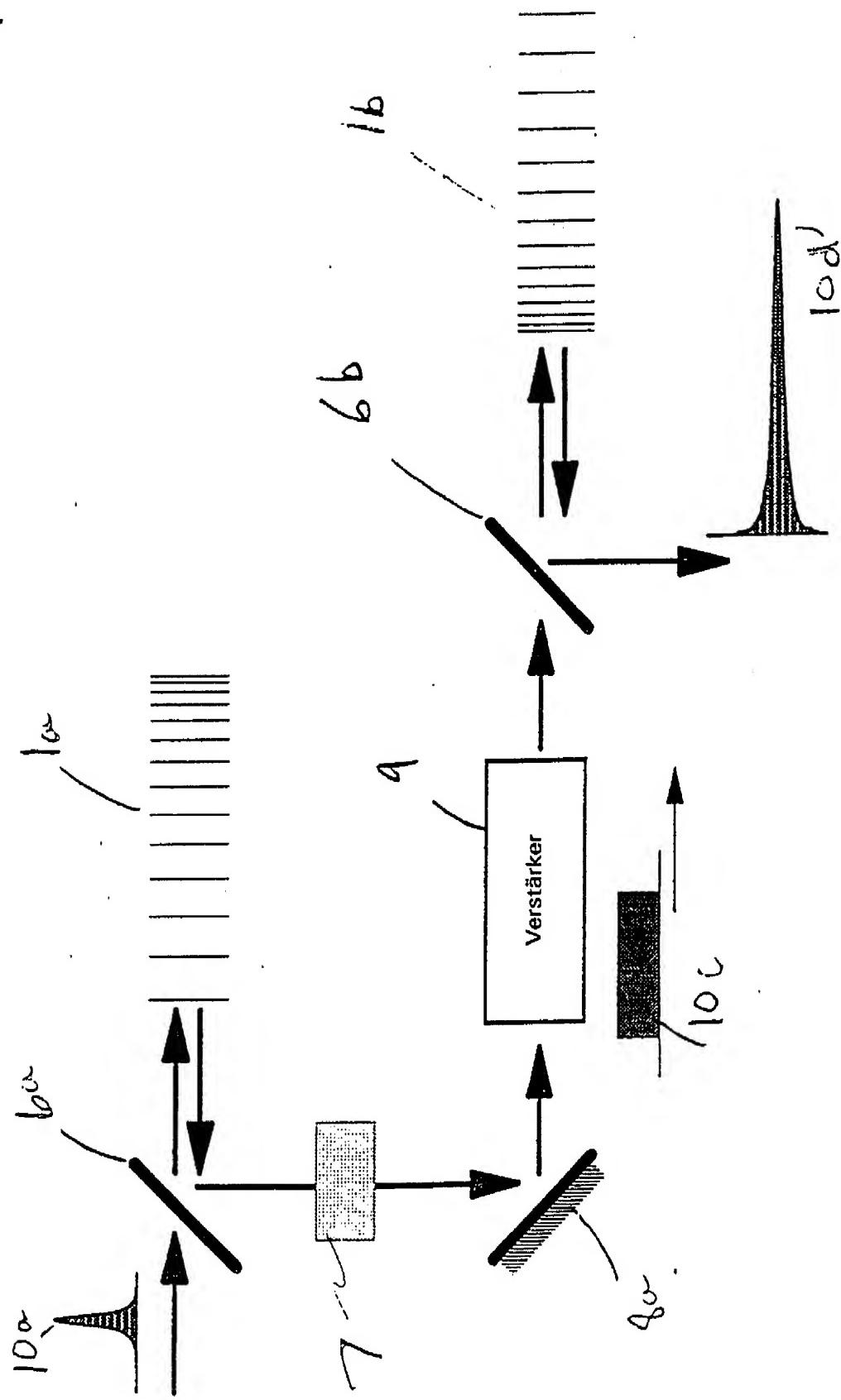


Fig. 3

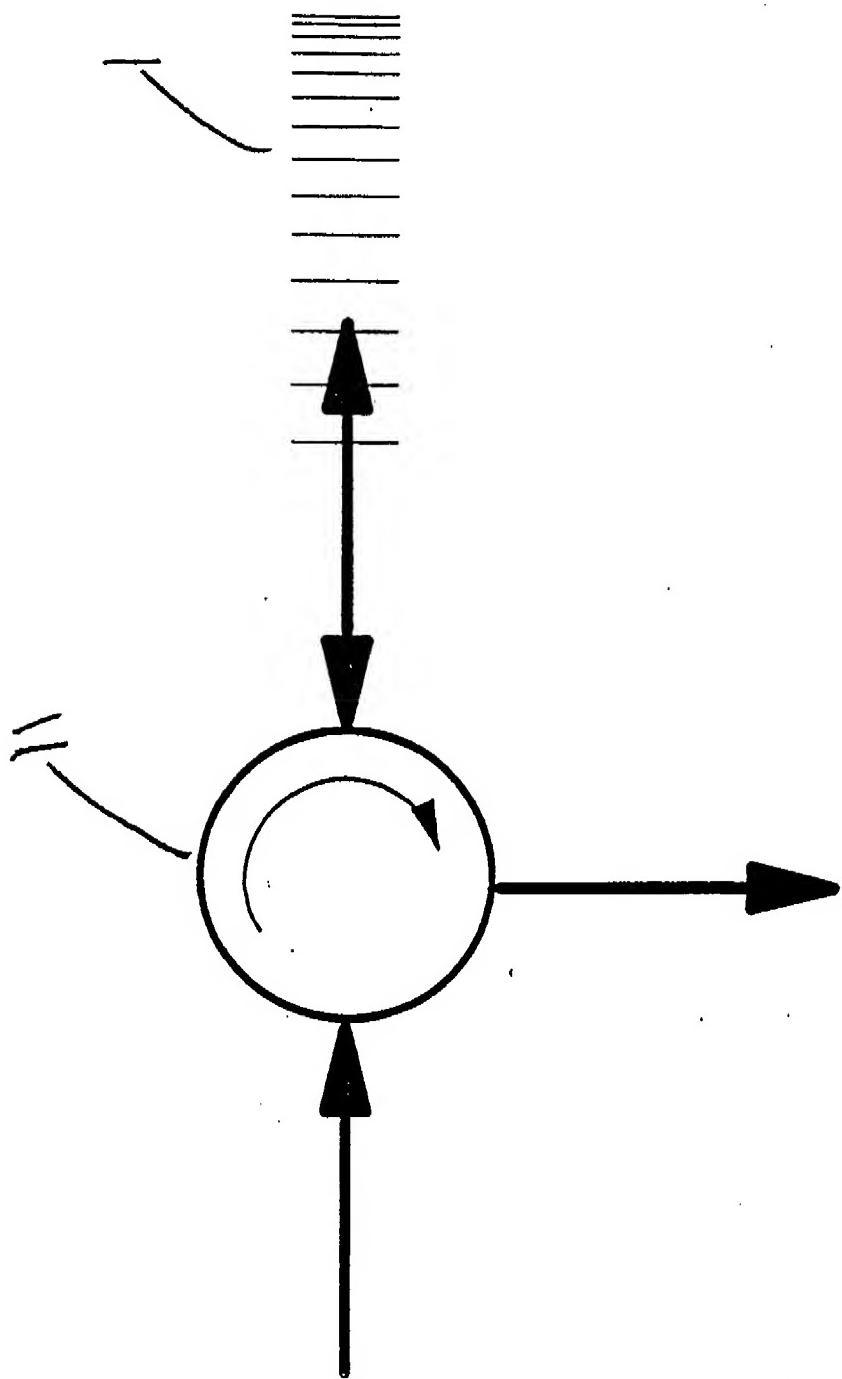


Fig. 4a

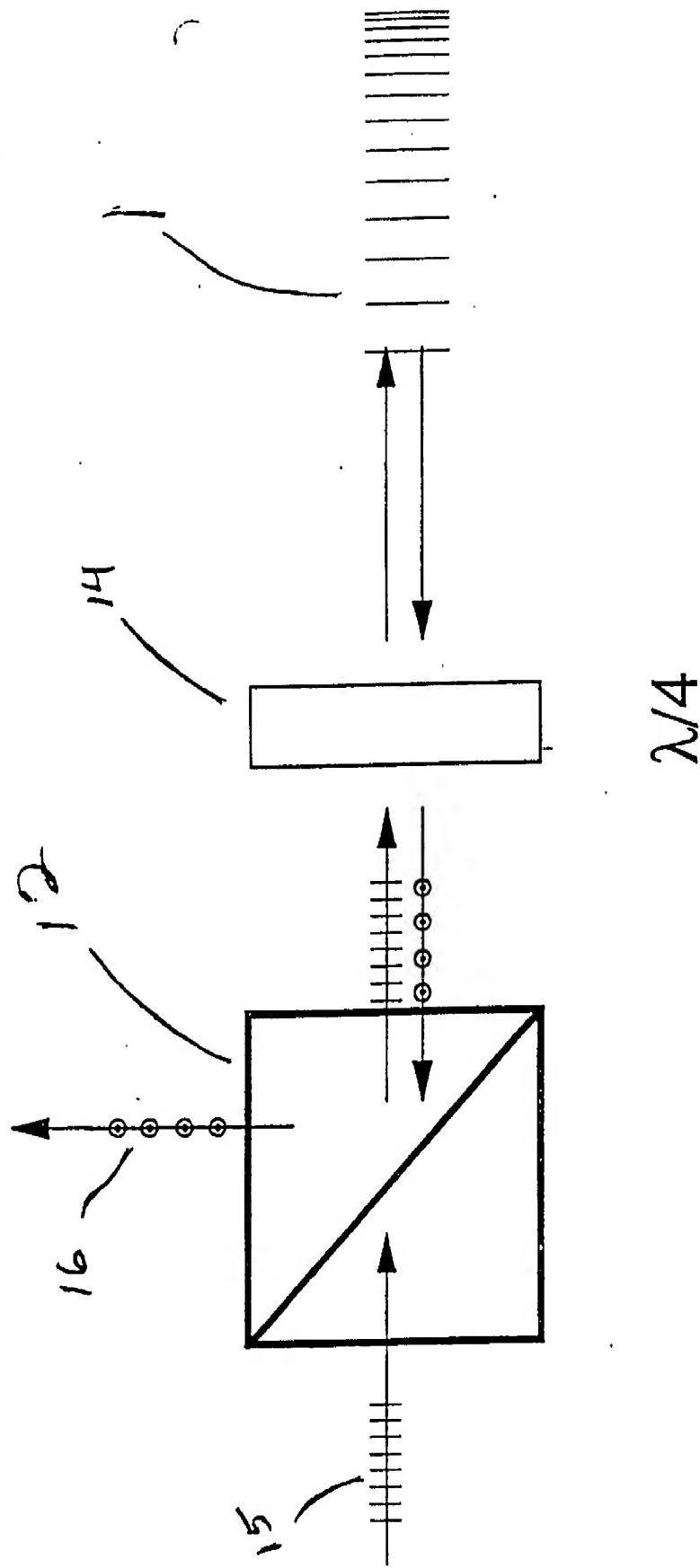


Fig. 4b

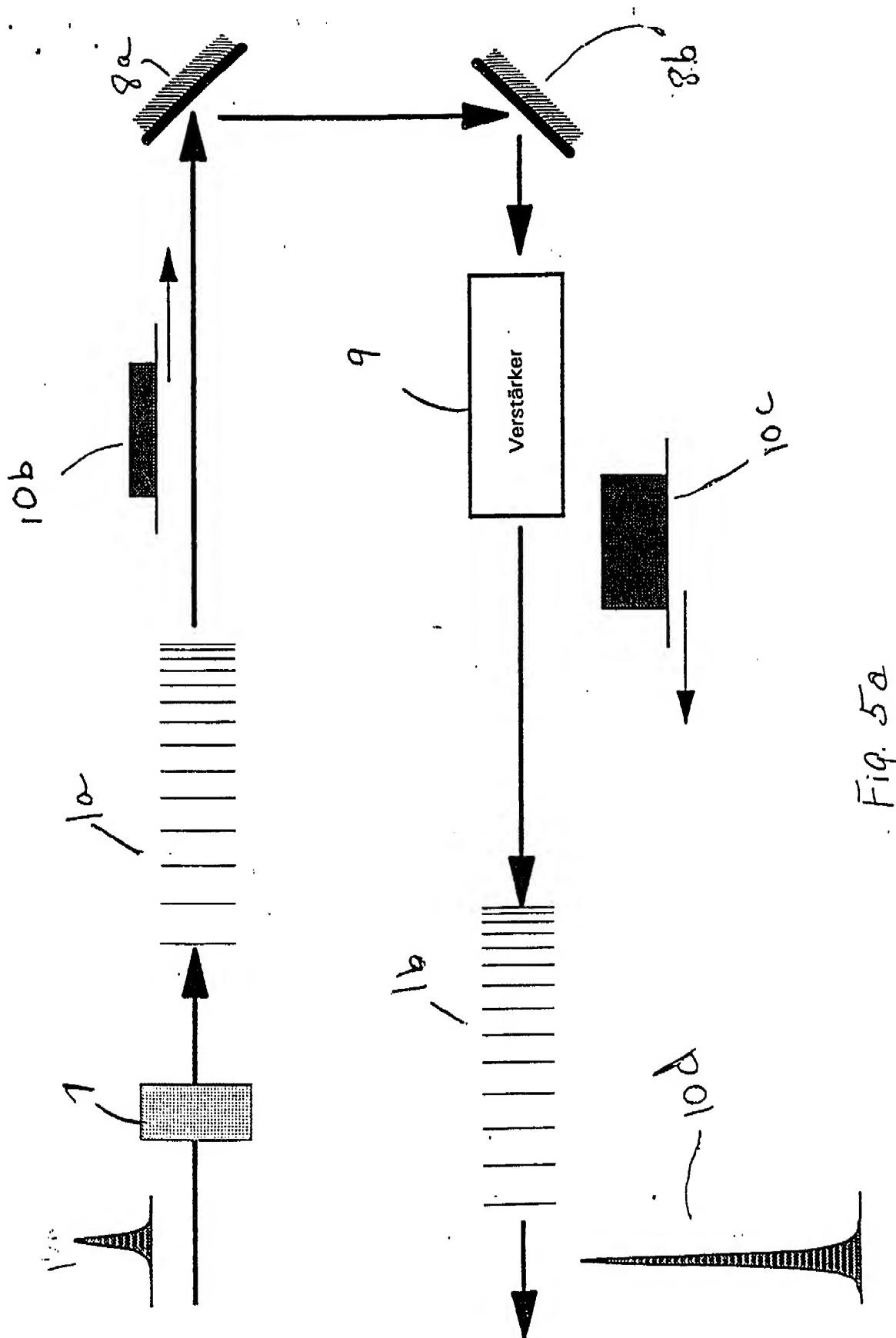


Fig. 5a

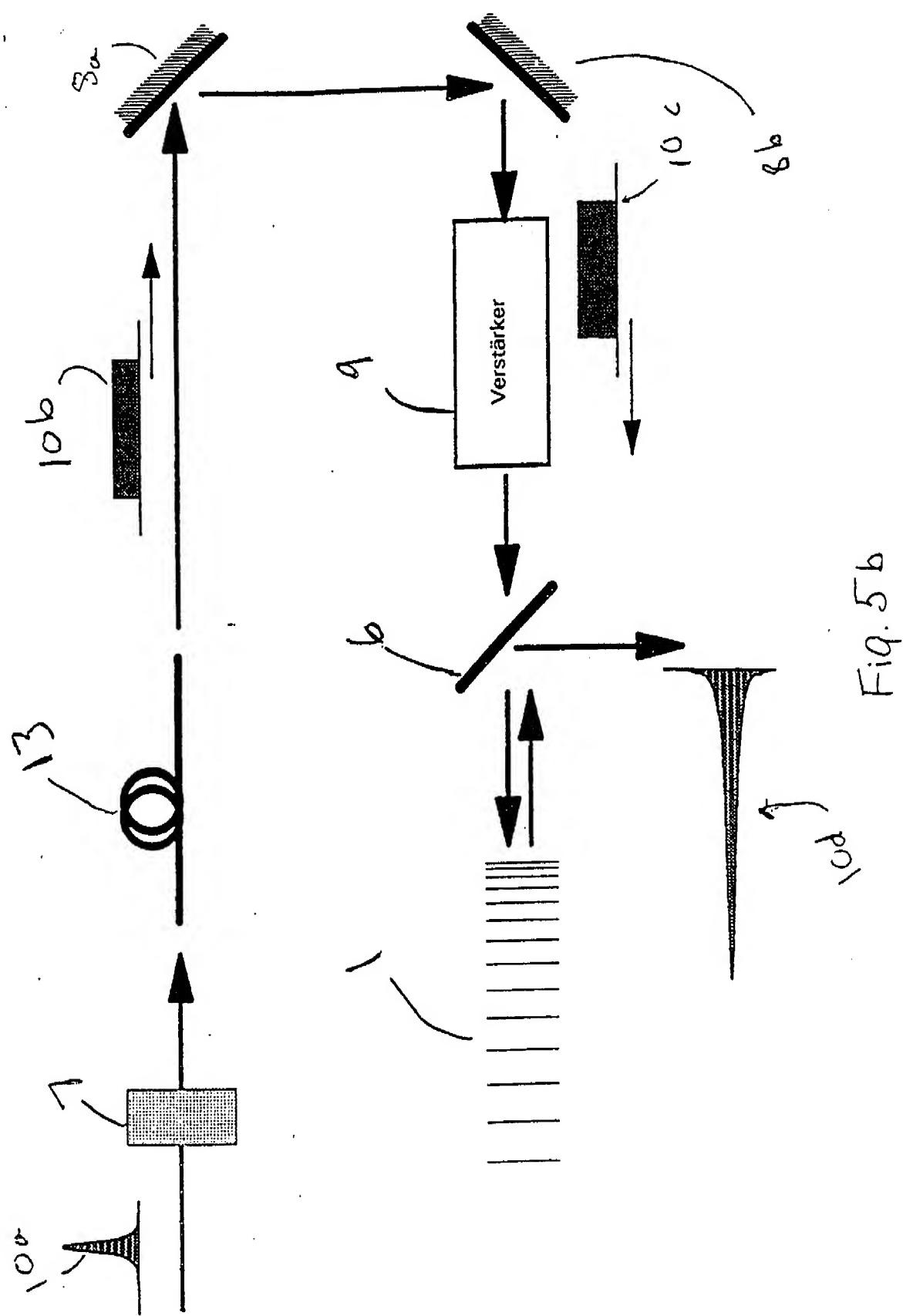


Fig. 5 b

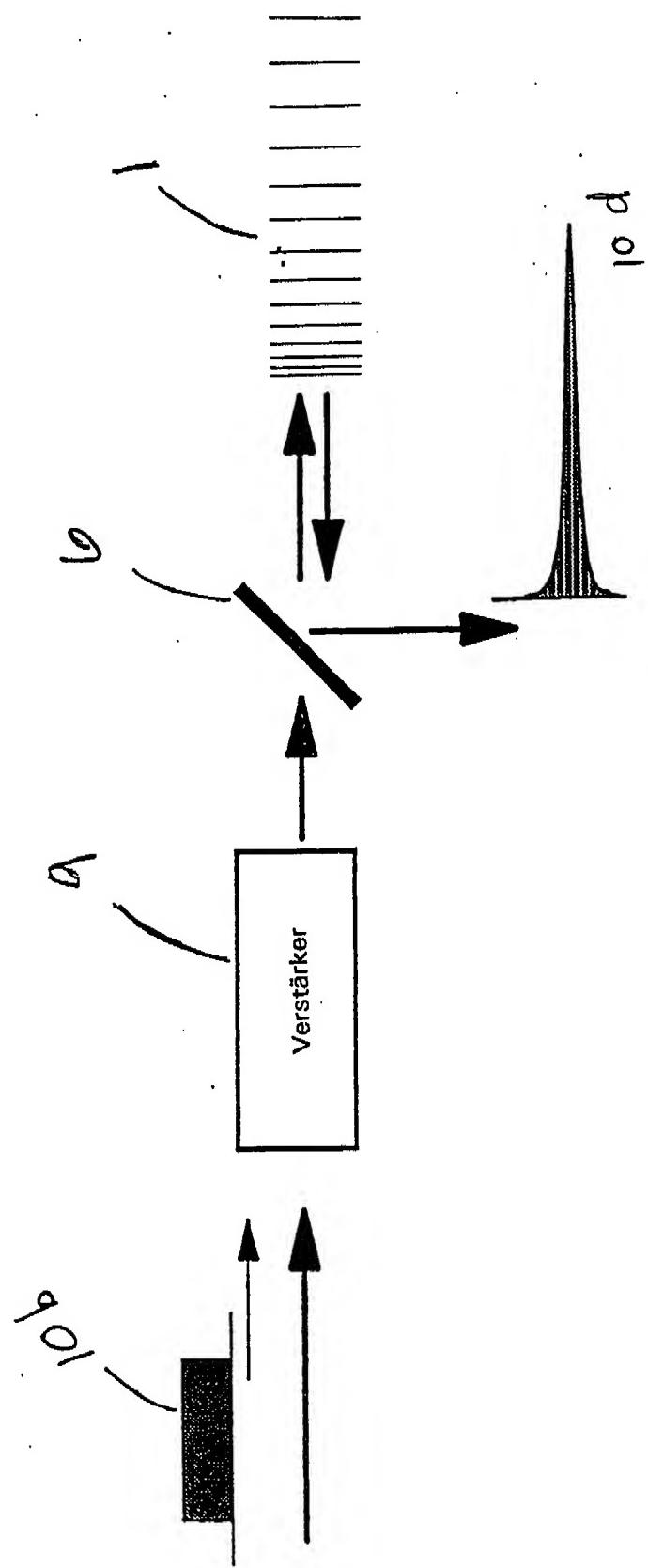
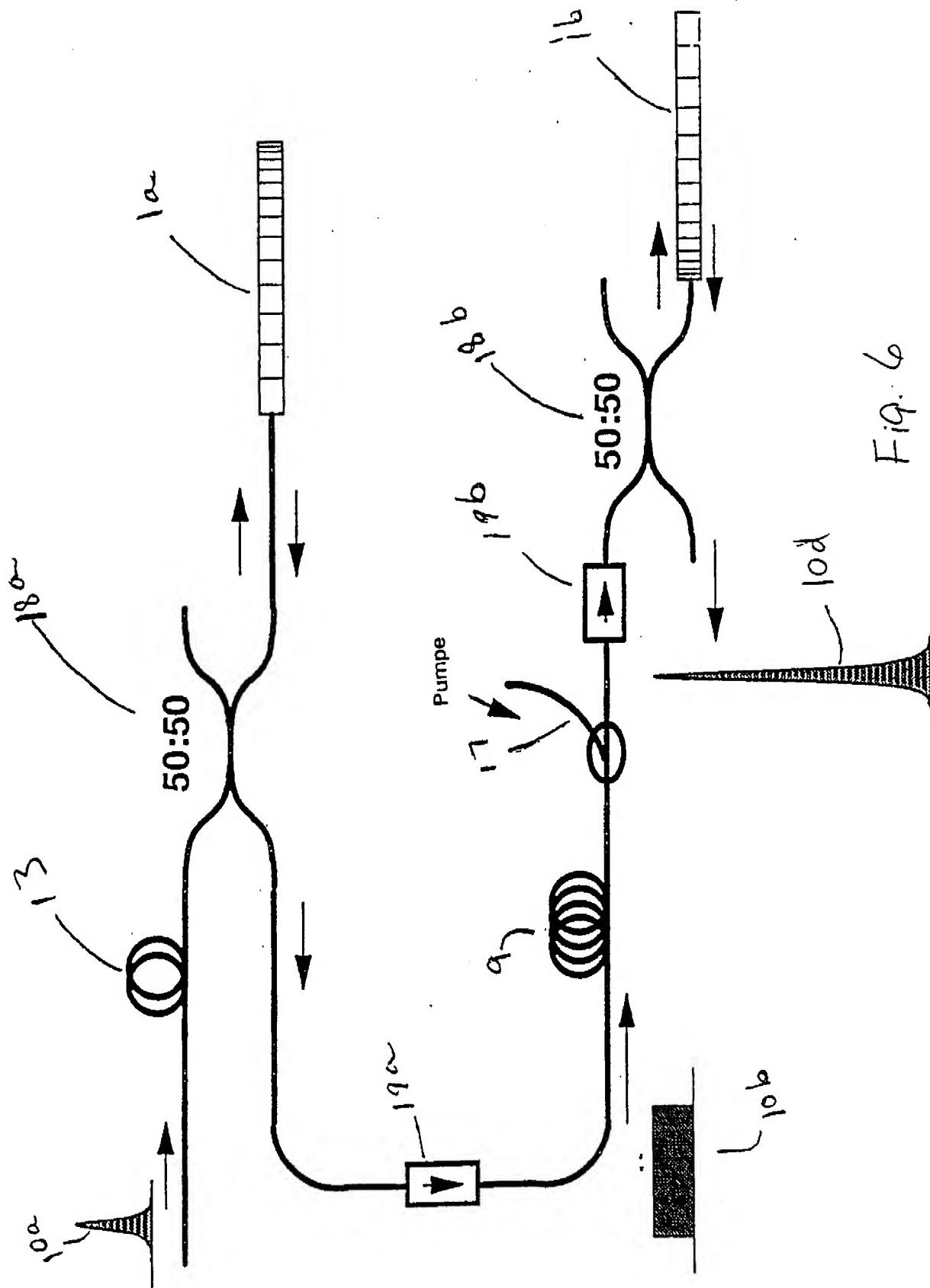


Fig. 5c



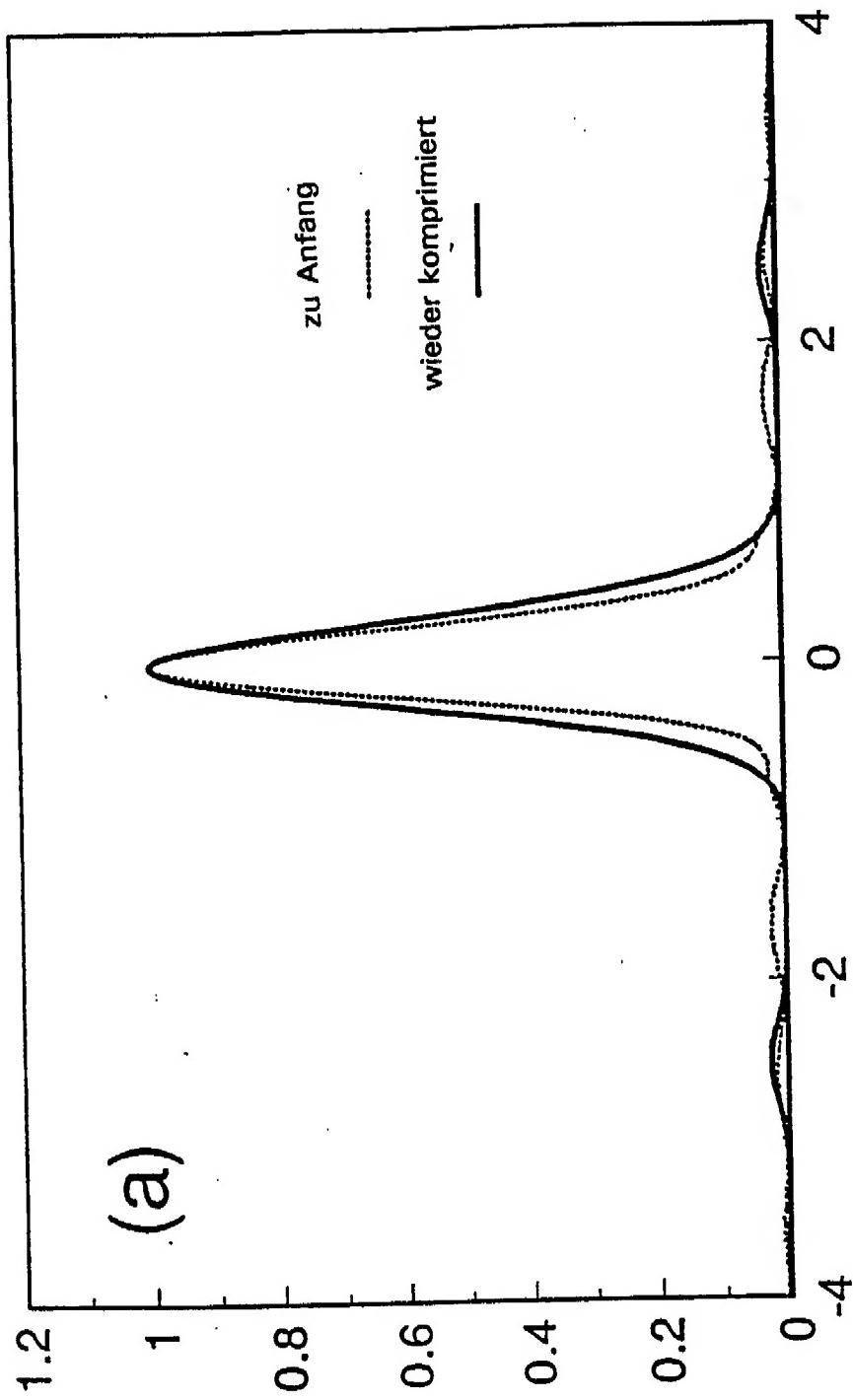


Fig 7a

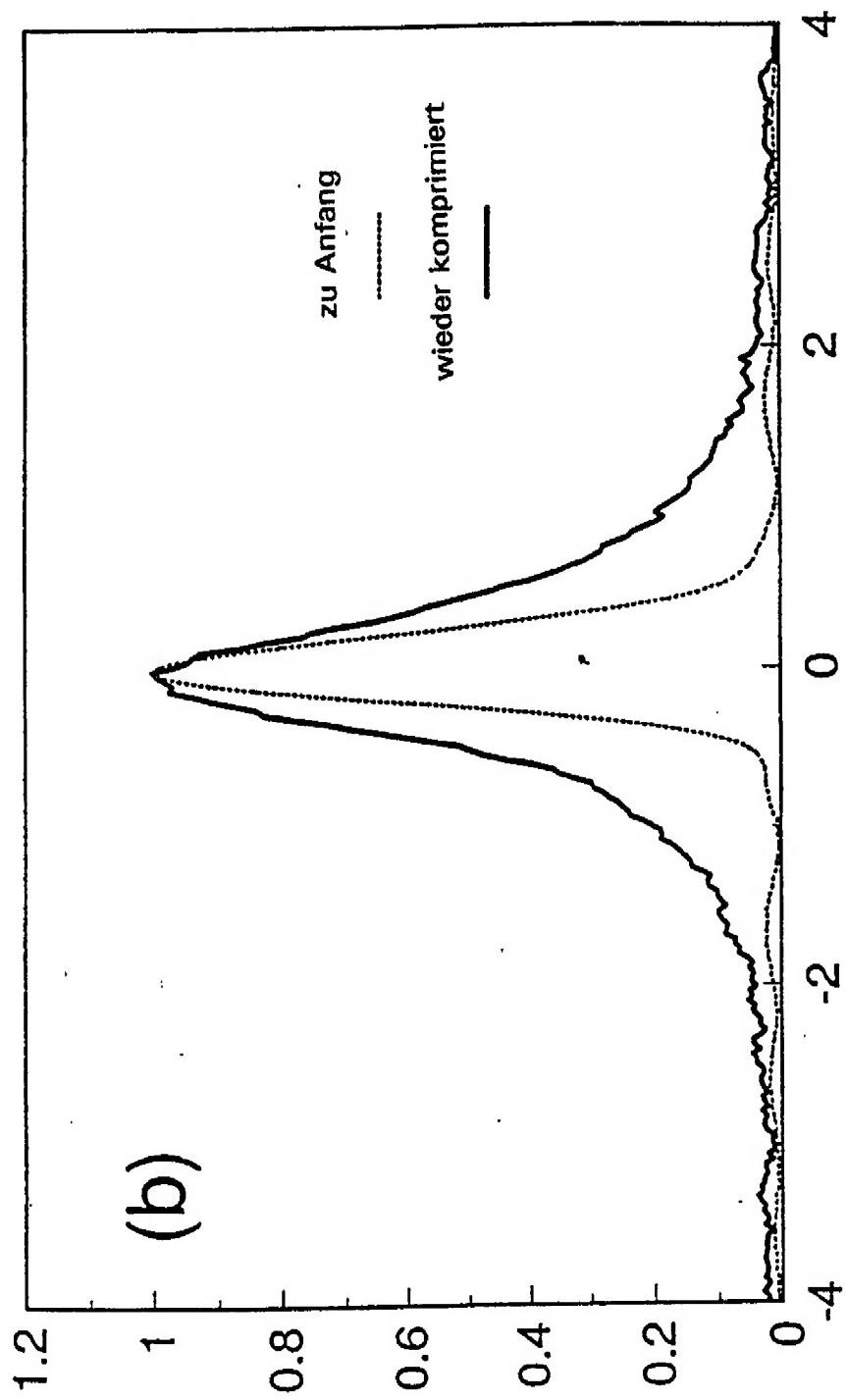


Fig. 7b